

Министерство образования и науки РФ

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

УДК 621.9

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке

_____ Кружаев В.В.

«___» _____ 2013

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

В рамках выполнения п.1.2.2.3 Плана реализации мероприятий Программы развития
УрФУ на 2013 год

ПО ТЕМЕ:

Влияние электрической изоляции режущего инструмента на параметры процесса резания
титановых сплавов

(Заключительный)

Зав.кафедрой

(подпись, дата)

Пегашкин В. Ф.

Научный руководитель

(подпись, дата)

Пегашкин В. Ф.

Исполнитель

(подпись, дата)

Медисон В. В.

Екатеринбург 2013

Реферат

1. ФИО автора (ов): Медисон Виталий Викторович

Medison Vitaly V.

2. Аннотация: В работе рассмотрен метод повышения стойкости металлорежущего инструмента посредством его электрической изоляции. Показана его эффективность при точении и сверлении титановых сплавов. Показана необходимость разработки нового теоретического объяснения наблюдаемым явлениям. Представлены результаты экспериментального исследования влияния электрической изоляции на термоЭДС, силу тока и силу резания при точении титановых сплавов. Предложено новое объяснение явлению повышения стойкости режущего инструмента в условиях электрической изоляции, основанное на теории электро-пластической деформации.

The paper presents the method of increasing tool life by means of cutting tool electrical insulation. The effectiveness of the method is shown when turning and drilling of the titanium alloys. The necessity of the development of the new explanation for the observed phenomenon is shown. The results of the experimental study of the effect of cutting tool electrical insulation on thermoEMF, amperage and cutting force are presented when turning of the titanium alloys. A novel explanation of the tool life increasing when cutting tool electrical insulation based on the electro-plastic deformation theory is proposed.

3. Ключевые слова: электрическая изоляция, режущий инструмент, износ, электро-пластическая деформация

electrical insulation; cutting tool; wear; electro-plastic deformation;

4. Тема отчета: Влияние электрической изоляции режущего инструмента на параметры процесса резания титановых сплавов

The effect of the cutting tool electrical insulation on the parameters of the machining of the titanium alloys

Содержание

Содержание	3
Введение	4
Материалы и методика исследования	7
Результаты и их обсуждение	10
Заключение.....	23
Список использованных источников.....	24

Введение

Известен способ повышения стойкости режущего инструмента при обработке металлов и токопроводящих материалов, состоящий в электрической изоляции режущего инструмента при помощи вспомогательного инструмента и технологической оснастки, изготовленных из титановых сплавов марок ВТЗ-1 и ОТ4, на поверхности которых посредством термического оксидирования в печи при температуре 750...800 °С в течение 5...6 часов создан оксидный слой, обладающий повышенным электрическим сопротивлением (рис. 1), глубиной 10...60 мкм (рис. 2) [1].

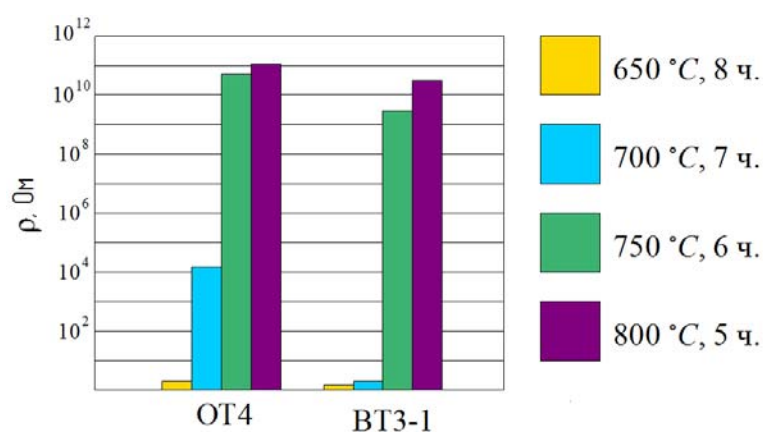


Рис. 1. Электрическое сопротивление поверхности титановых сплавов после термического оксидирования

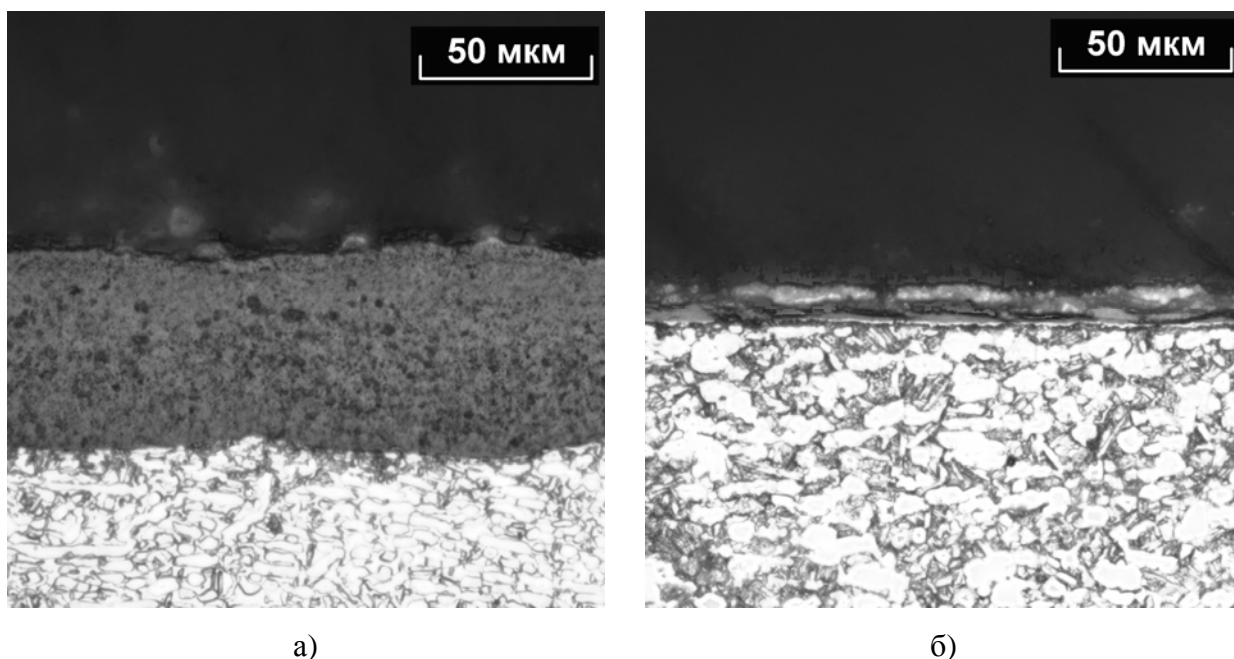


Рис. 2. Толщина оксидного слоя на поверхности титанового сплава после термического оксидирования при температуре 750 °С в течение 6 часов: а) ОТ4, б) ВТЗ-1

Использование данного способа позволяет повысить стойкость сменных неперетачиваемых твердосплавных пластин при точении в 1,44...2,05 раза (табл. 1), и спиральных сверл из быстрорежущей стали в 1,62...2,76 раза (табл. 2).

Таблица 1

Результаты исследования стойкости резцов (износ по задней грани $h_3 = 0,2$ мм)

$V, \text{м/мин.}$	$S, \text{мм/мин.}$	$t, \text{мм.}$	Обрабатываемый сплав	Изоляция	$T, \text{мин.}$	$T_{\text{из}}/T$
62,8	0,67	1,0	BT1-0	+	16,79	1,44
				–	11,64	
			OT4	+	19,48	1,59
				–	12,24	
			BT6	+	8,53	2,05
				–	4,16	
			VST 5553	+	5,95	1,82
				–	3,27	

Таблица 2

Результаты исследования стойкости спиральных сверл

№	Изоляция	$d, \text{мм.}$	$n, \text{об/мин.}$	$V, \text{м/мин.}$	BT1-0		OT4		BT6	
					$T_{\text{ср}}, \text{мин.}$	$T_{\text{из}}/T$	$T_{\text{ср}}, \text{мин.}$	$T_{\text{из}}/T$	$T_{\text{ср}}, \text{мин.}$	$T_{\text{из}}/T$
1	+	2,5	180	1,413	9,71	2,16	11,38	1,77	3,96	2,02
2	–	2,5			4,50		6,42		1,96	
3	+	2,5	500	3,925	6,09	2,36	5,55	1,66	2,09	2,27
4	–	2,5			2,58		3,34		0,92	
5	+	2,5	1000	7,85	5,97	1,97	6,13	1,54	2,16	1,93
6	–	2,5			3,03		3,98		1,12	
7	+	3,7	125	1,413	18,91	2,39	16,09	1,83	9,97	2,38
8	–	3,7			7,90		8,79		4,19	
9	+	3,7	355	3,925	12,17	2,09	10,13	2,37	4,27	1,62
10	–	3,7			5,83		4,28		2,64	
11	+	3,7	710	7,85	13,05	1,79	12,29	2,31	4,88	1,70
12	–	3,7			7,28		5,32		2,87	
13	+	5,0	90	1,413	39,50	2,41	29,92	2,28	18,17	1,77
14	–	5,0			16,42		13,13		9,71	
15	+	5,0	250	3,925	21,42	2,76	14,59	1,99	6,34	2,00
16	–	5,0			7,75		7,34		3,38	
17	+	5,0	500	7,85	23,78	2,54	15,24	1,88	6,55	1,74
18	–	5,0			9,35		8,10		3,77	

Однако, несмотря на положительные результаты, на сегодняшний день отсутствует единая общепринятая модель, которая бы объясняла наблюдаемое повышение стойкости. Наибольшее распространение получила электродиффузионная модель, представленная в

работах [2 – 4]. Данная модель связывает повышение стойкости режущего инструмента в условиях электрической изоляции с уменьшением взаимной диффузии компонентов инструментального и обрабатываемого сплава. Однако, данные, полученные посредством атомно-эмиссионной спектроскопии стружки из титанового сплава BT1-0, показывают, что электрическая изоляция практически не оказывает никакого воздействия на величину диффузии компонентов инструментального материала в стружку (табл. 3).

Таблица 3

Химический состав стружки BT1-0, полученной при сверлении инструментом из стали Р6М5 в условиях электрической изоляции и без таковой

		Химический элемент						
		Fe	C	Cr	V	W	N	O
Масс. доля хим. элем. в стружке, %	В обычных условиях	0,028	0,007	0,013	0,0042	0,001	0,001	0,156
	В условиях электро-изоляции	0,028	0,007	0,013	0,0040	0,001	0,001	0,168

В то же время существует информация о том, что электрический ток приводит к изменению силы резания [5], следовательно, логично, что объяснение наблюдаемым явлениям должно учитывать изменение напряжений в зоне резания, силы резания и пластической деформации срезаемого слоя под действием электрической изоляции режущего инструмента.

Основу для такого объяснения дает теория электропластической деформации металлов.

Цель работы: исследование влияния электрической изоляции резцов на параметры процесса резания при точении титановых сплавов различных марок.

Задачи:

1. Исследовать влияние параметров режима резания (скорость, подача, глубина резания) и электрической изоляции на термоэлектрические явления в зоне резания (термоЭДС и термоток) при точении титановых сплавов марок BT1-0, OT4, BT6 и VST5553;
2. Исследовать влияние параметров режима резания и электрической изоляции на силу резания при точении титановых сплавов марок BT1-0, OT4, BT6 и VST5553;
3. Исследовать влияние параметров режима резания и электрической изоляции на усадку стружки при точении титановых сплавов марок BT1-0, OT4, BT6 и VST5553.

Материалы и методика исследования

Исследовали величину термоЭДС, силы тока, силы резания и усадки стружки при точении титановых сплавов, марки, химический состав и некоторые свойства которых представлены в табл. 4.

Таблица 4

Физические и механические свойства исследуемых титановых сплавов в отожженном состоянии

Марка сплава	Средний химический состав, мас. %	Механические свойства		Физические свойства	
		σ_B	KCU	E	α
		МПа	кДж/м ²	ГПа	Вт/(м·град)
BT1-0	Технический титан	345	500	112	8,85
OT4	Ti-3,5Al-1,5Mn	685	500	115	8
BT6	Ti-5Al-4V	885	400	115	8,37
VST 5553	Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr	1190	300	115	8

Исследования проводились при точении прутков из данных титановых сплавов на токарно-винторезном станке ФТ-11 с использованием токарных резцов PTTNR 2525M 22, оснащенных неперетачиваемыми пластинами TNMG220408-SF из твердого сплава марки 1105.

Для исследования термоЭДС и силы тока при точении использовалась экспериментальная установка, изображенная на рис. 3 и 4.

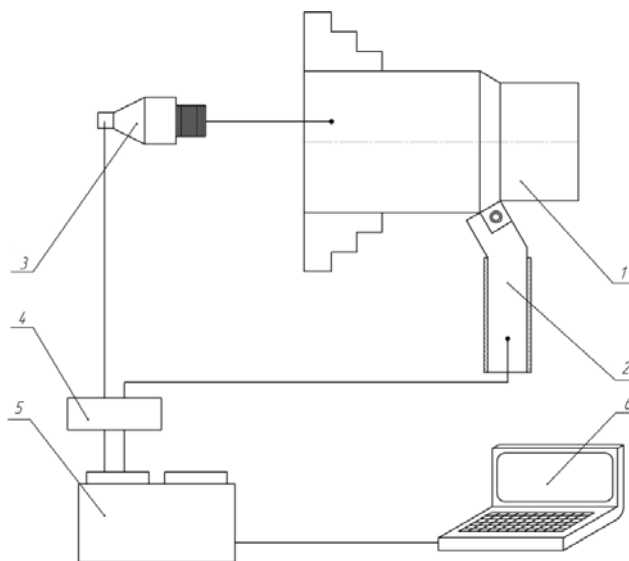


Рис. 3. Экспериментальная установка:

- 1 – пруток; 2 – резец; 3 – электрический соединитель Mercotac 110; 4 – шунт 75ШСУЗ;
5 – плата сбора данных NI-USB 6210; 6 – персональный компьютер



Рис. 4. Экспериментальная установка

Сбор и анализ данных осуществлялся в программном пакете NI LabVIEW 2010. Для выделения сигнала использовался фильтр Чебышева первого рода. Частота дискретизации во всех опытах была принята равной 1 кГц, соответственно полоса пропускания фильтра Чебышева была задана в пределах от 25 до 400 Гц, что позволило устранить как высокочастотные, так и низкочастотные шумы.

Для исследования силы резания при точении использовалась установка, приведенная на рис. 5 и 6.

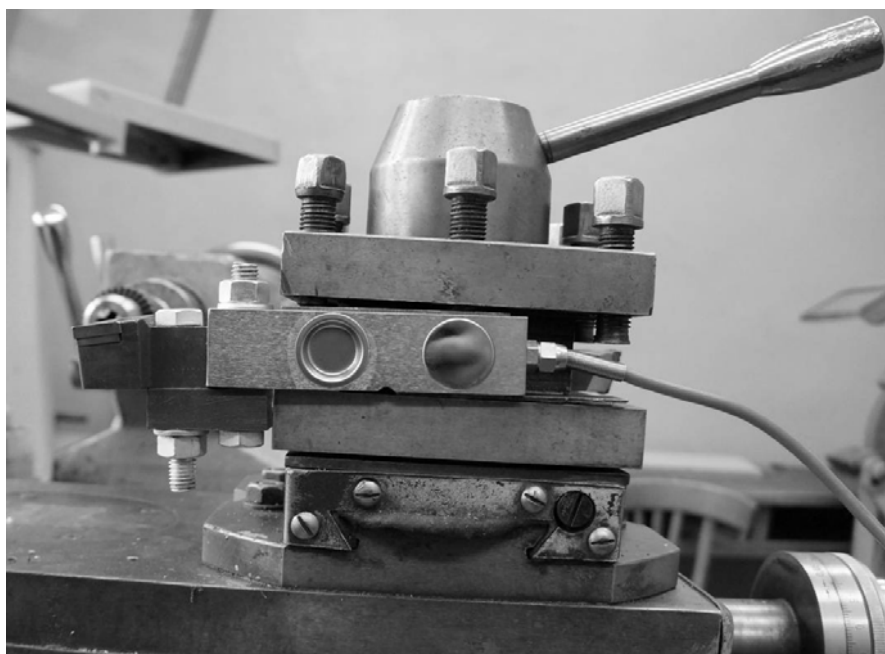


Рис. 5. Установка для измерения силы резания

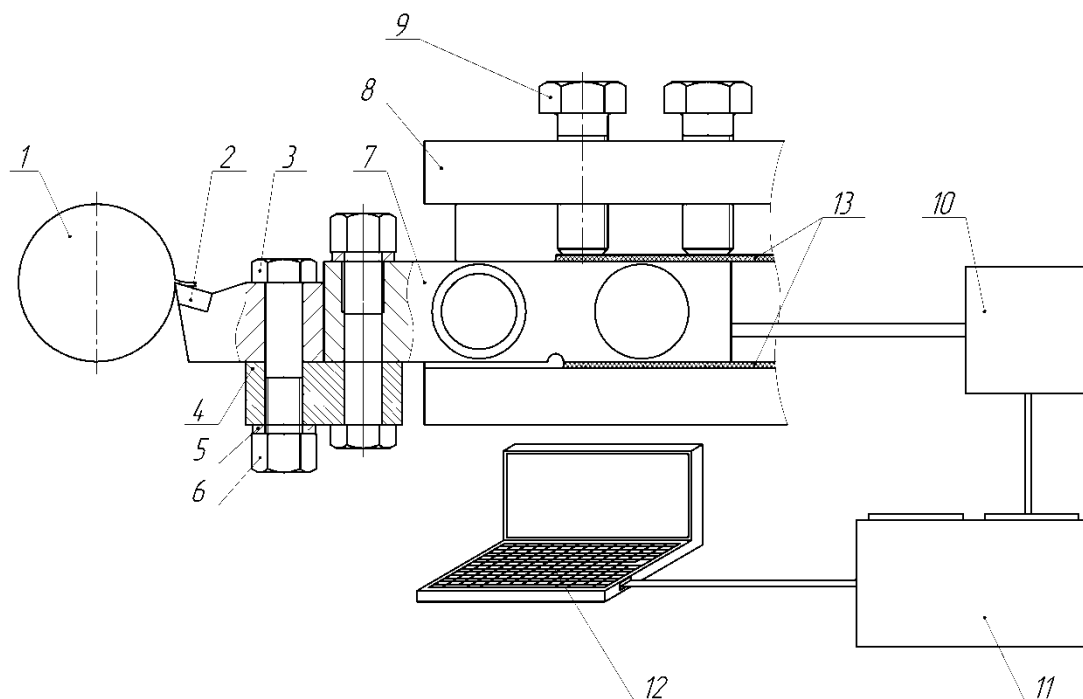


Рис. 6. Схема установки для измерения силы резания: 1 – обрабатываемая деталь; 2 – резец; 3 – болт М12; 4 – трубка; 5 – шайба; 6 – гайка М12; 7 – балочный тензодатчик SBA; 8 – резцедержатель; 9 – винты резцедержателя; 10 – усилитель сигнала датчика; 11 – плата сбора данных NI USB 6210; 12 – персональный компьютер

Электрическую изоляцию резца осуществляли посредством способа, описанного в [1] с использованием верхней и нижней пластин, изготовленных из титанового сплава ОТ4, на поверхности которого посредством термического оксидирования при температуре 750 °С и выдержке 6 часов создан оксидный слой с повышенным электрическим сопротивлением.

Результаты и их обсуждение

Существует три основных механизма воздействия электрического тока на металл в зоне резания [6– 8]:

1. подогрев металла за счет выделения тепла по закону Джоуля-Ленца;
2. электронно-пластический эффект;
3. пинч-эффект (действие собственного магнитного поля металла).

По мнению авторов, основной причиной, обуславливающей повышение стойкости режущего инструмента при обработке титановых сплавов, является устранение электронно-пластического эффекта.

В общем случае электронно-пластический эффект состоит в следующем [6]: при движении электронов в деформируемом проводнике часть энергии рассеивается на дефектах решетки, главным образом на дислокациях. При этом на кристаллическую решетку действует сила электронного увлечения F_j , пропорциональная дрейфовой скорости электронов $V = -j/(en)$, где j – плотность электрического тока, e – элементарный заряд, n – концентрация электронов проводимости. Как следствие на единицу длины кристаллической решетки действует дополнительная сила:

$$F_j = BV, \quad (1)$$

где B – коэффициент электронного торможения дислокаций, по данным работ [6 – 7] оцениваемый как $B \sim 10^{-4}$ г/(см·с).

Это приводит к возникновению дополнительных механических напряжений в зоне резания, определяемых из соотношения:

$$\sigma_s \approx \frac{m_e V_F j}{e}, \quad (2)$$

где m_e – масса электрона, V_F – фермиевская скорость электронов, j – плотность тока, e – элементарный заряд электрона.

При этом, однако, в соответствии с третьим законом Ньютона, сила, действующая со стороны срезаемого слоя на поверхность инструмента должна складываться из двух компонентов, как показано на рис. 7.

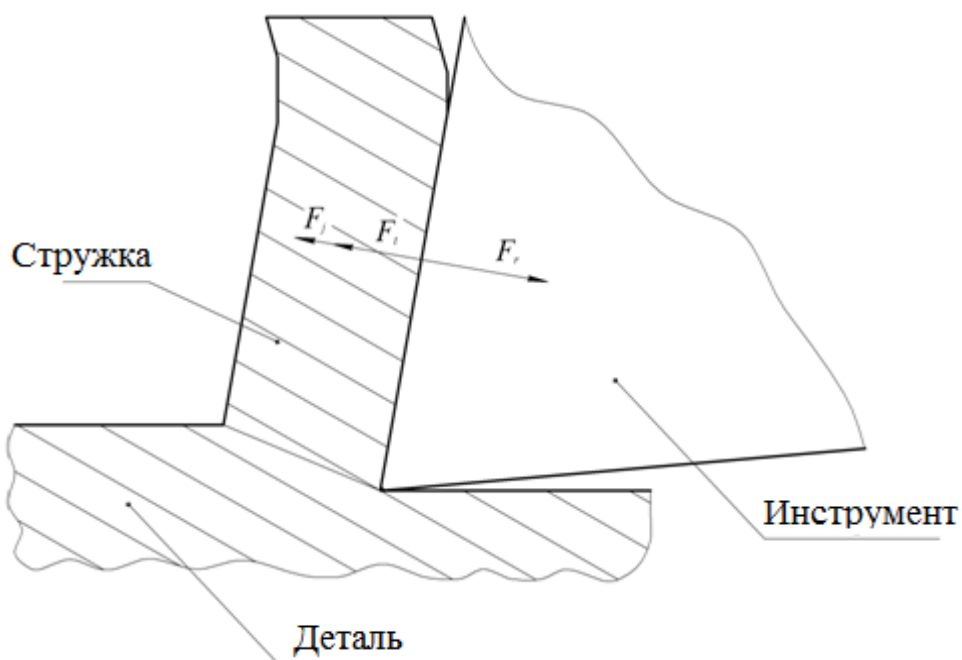


Рис. 7. Силевая схема: F_j – сила электронного увлечения; F_t – сила, с которой инструмент воздействует на стружку; F_r – сила реакции, с которой стружка воздействует на инструмент

Очевидно, что:

$$F_r = F_t + F_j, \quad (3)$$

Таким образом, электрическая изоляция режущего инструмента должна приводить к уменьшению силы резания за счет исчезновения силы электронного увлечения F_j . Таким образом, уменьшение износа режущего инструмента можно объяснить уменьшением силы резания. Подтверждение этому было найдено экспериментально.

Результаты экспериментов по измерению термоЭДС при точении приведены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты измерения термоЭДС при точении

№	n , об/мин.	s , мм/об.	t , мм.	Средняя термоЭДС E , мВ			
				BT1-0	OT4	BT6	VST5553
1	31,5	0,1	0,1	1,27	1,38	1,69	1,88
2	125	0,1	0,1	2,89	2,38	3,06	3,57
3	250	0,1	0,1	4,74	3,56	5,63	4,71
4	31,5	0,1	0,5	1,89	2,06	2,93	1,55
5	125	0,1	0,5	4,30	3,63	3,75	4,08
6	250	0,1	0,5	7,38	4,80	6,42	5,43
7	31,5	0,1	1,0	2,44	2,03	1,98	1,94
8	125	0,1	1,0	5,37	3,75	4,07	4,39

Таблица 5 (окончание)

Результаты измерения термоЭДС при точении

№	n, об/мин.	s, мм/об.	t, мм.	Средняя термоЭДС E, мВ			
				BT1-0	OT4	BT6	VST5553
9	250	0,1	1,0	8,05	3,73	6,57	5,64
10	31,5	0,38	0,1	1,44	2,63	2,30	2,07
11	125	0,38	0,1	4,74	3,37	5,56	3,64
12	250	0,38	0,1	6,76	5,00	6,81	6,59
13	31,5	0,38	0,5	3,03	2,34	3,07	3,06
14	125	0,38	0,5	6,39	4,82	6,52	4,59
15	250	0,38	0,5	9,24	5,88	8,20	7,82
16	31,5	0,38	1,0	4,02	3,09	4,28	3,45
17	125	0,38	1,0	7,96	4,85	7,35	4,97
18	250	0,38	1,0	10,27	6,39	9,37	8,92
19	31,5	0,67	0,1	1,92	2,97	3,55	2,33
20	125	0,67	0,1	5,52	4,23	4,87	4,89
21	250	0,67	0,1	7,36	5,96	7,68	7,80
22	31,5	0,67	0,5	3,60	2,87	4,06	3,48
23	125	0,67	0,5	7,48	5,73	6,78	6,21
24	250	0,67	0,5	10,26	7,27	9,56	9,91
25	31,5	0,67	1,0	4,62	3,65	3,15	3,44
26	125	0,67	1,0	8,56	6,45	8,12	7,09
27	250	0,67	1,0	12,21	8,40	10,29	9,33

Некоторые графики зависимости термоЭДС от времени резания, полученные изложенным выше методом, приведены на рис. 8 – 11.

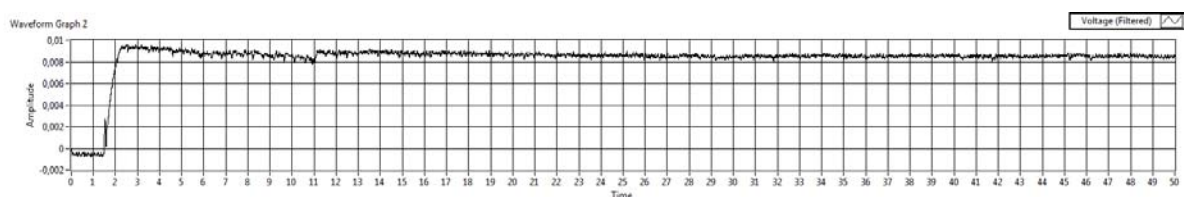


Рис. 8. ТермоЭДС при обработке сплава BT1-0 на режимах:

$n = 125$ об/мин, $s = 0,67$ мм/мин., $t = 1,0$ мм.

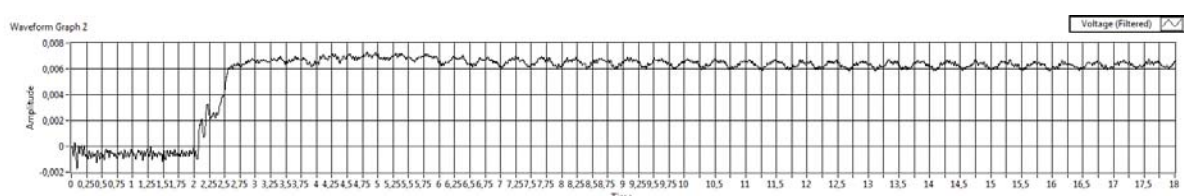


Рис. 9. ТермоЭДС при обработке сплава OT4 на режимах:

$n = 125$ об/мин, $s = 0,67$ мм/мин., $t = 1,0$ мм.

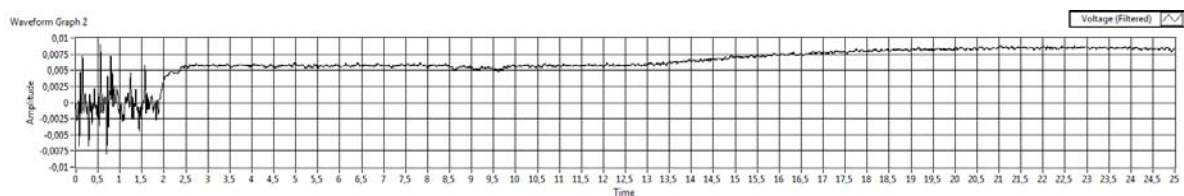


Рис. 10. ТермоЭДС при обработке сплава ВТ6 на режимах:

$$n = 125 \text{ об/мин}, s = 0,67 \text{ мм/мин.}, t = 1,0 \text{ мм.}$$

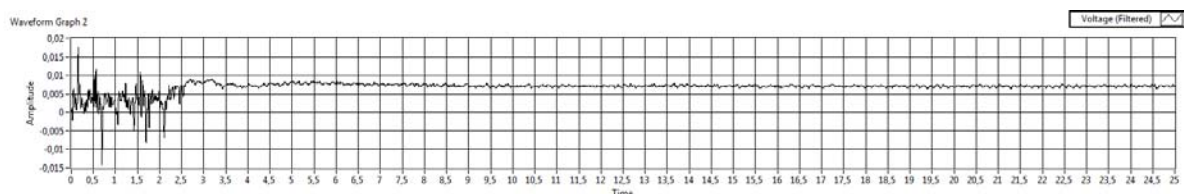


Рис. 11. ТермоЭДС при обработке сплава VST5553 на режимах:

$$n = 125 \text{ об/мин}, s = 0,67 \text{ мм/мин.}, t = 1,0 \text{ мм.}$$

По результатам регрессионного анализа термоЭДС при точении были получены следующие модели зависимости термоЭДС от параметров режима резания:

$$\text{BT1-0} \quad E = 0,60 \cdot n^{0,58} \cdot s^{0,27} \cdot t^{0,27} \quad R^2 = 0,87 \quad (4)$$

$$\text{OT4} \quad E = 1,06 \cdot n^{0,38} \cdot s^{0,29} \cdot t^{0,13} \quad R^2 = 0,90 \quad (5)$$

$$\text{BT6} \quad E = 0,88 \cdot n^{0,47} \cdot s^{0,27} \cdot t^{0,13} \quad R^2 = 0,97 \quad (6)$$

$$\text{VST5553} \quad E = 0,66 \cdot n^{0,51} \cdot s^{0,25} \cdot t^{0,12} \quad R^2 = 0,99 \quad (7)$$

Результаты измерения силы тока в системе приведены в табл. 6.

Таблица 6

Результаты измерения силы тока при точении

№	n, об/мин.	s, мм/об.	t, мм.	Ток I, мА			
				BT1-0	OT4	BT6	VST5553
1	31,5	0,1	0,1	0,207	0,146	0,122	0,086
2	125	0,1	0,1	0,383	0,247	0,230	0,180
3	250	0,1	0,1	0,508	0,260	0,295	0,207
4	31,5	0,1	0,5	0,197	0,207	0,161	0,129
5	125	0,1	0,5	0,467	0,296	0,299	0,186
6	250	0,1	0,5	0,760	0,313	0,450	0,246
7	31,5	0,1	1,0	0,216	0,228	0,194	0,140
8	125	0,1	1,0	0,581	0,279	0,381	0,220
9	250	0,1	1,0	0,737	0,423	0,521	0,299
10	31,5	0,38	0,1	0,254	0,206	0,213	0,132
11	125	0,38	0,1	0,526	0,330	0,387	0,226
12	250	0,38	0,1	0,763	0,350	0,523	0,294
13	31,5	0,38	0,5	0,254	0,251	0,299	0,187
14	125	0,38	0,5	0,734	0,340	0,528	0,286

Результаты измерения силы тока при точении

№	n , об/мин.	s , мм/об.	t , мм.	Ток I , мА			
				BT1-0	OT4	BT6	VST5553
15	250	0,38	0,5	0,980	0,407	0,704	0,398
16	31,5	0,38	1,0	0,381	0,239	0,326	0,218
17	125	0,38	1,0	0,742	0,385	0,641	0,288
18	250	0,38	1,0	1,037	0,526	0,858	0,409
19	31,5	0,67	0,1	0,313	0,233	0,275	0,162
20	125	0,67	0,1	0,510	0,334	0,452	0,252
21	250	0,67	0,1	0,840	0,433	0,653	0,340
22	31,5	0,67	0,5	0,320	0,254	0,347	0,207
23	125	0,67	0,5	0,782	0,404	0,621	0,295
24	250	0,67	0,5	1,016	0,488	0,894	0,402
25	31,5	0,67	1,0	0,476	0,325	0,426	0,227
26	125	0,67	1,0	0,921	0,480	0,789	0,352
27	250	0,67	1,0	1,261	0,532	0,960	0,462

Некоторые зависимости силы тока от времени, полученные в ходе эксперимента, приведены на рис. 12 – 15.

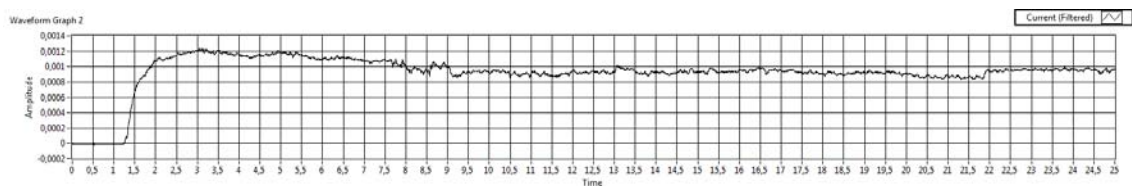


Рис. 12. Сила тока при обработке сплава BT1-0 на режимах:

$$n = 125 \text{ об/мин}, s = 0,67 \text{ мм/мин.}, t = 1,0 \text{ мм.}$$

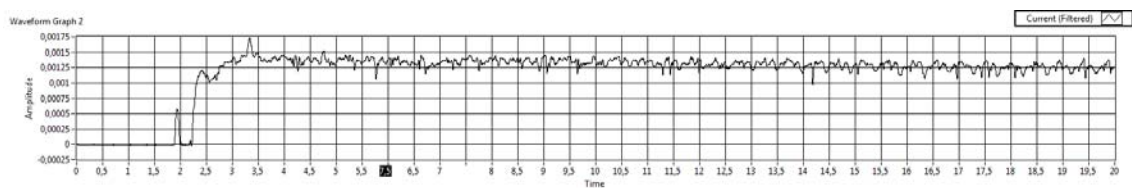


Рис. 13. Сила тока при обработке сплава OT4 на режимах:

$$n = 125 \text{ об/мин}, s = 0,67 \text{ мм/мин.}, t = 1,0 \text{ мм.}$$

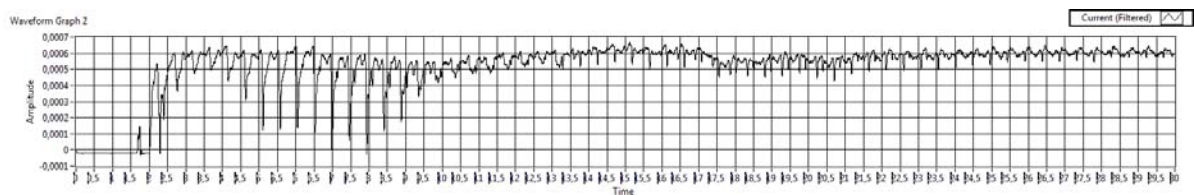


Рис. 14. Сила тока при обработке сплава BT6 на режимах:

$$n = 125 \text{ об/мин}, s = 0,67 \text{ мм/мин.}, t = 1,0 \text{ мм.}$$

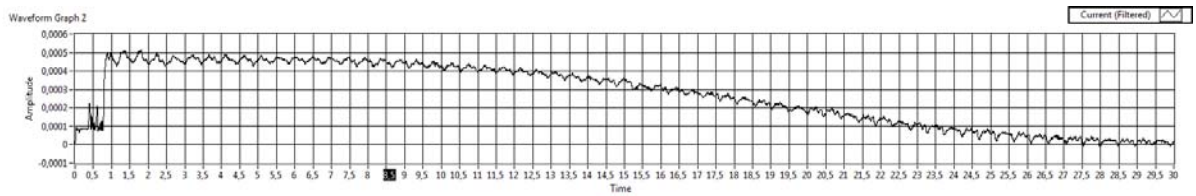


Рис. 15. Сила тока при обработке сплава VST5553 на режимах:

$$n = 125 \text{ об/мин}, s = 0,67 \text{ мм/мин.}, t = 1,0 \text{ мм.}$$

Следует отметить, что в результате измерения силы тока в изолированном состоянии были зафиксированы лишь небольшие величины силы тока порядка 2,5 мкА, которые не зависели от параметров режима резания, и, следовательно, могут быть отнесены к наведенным токам, неизбежно присутствующим в любой электромеханической системе. Следовательно, в условиях электрической изоляции ток в системе станок – инструмент – изделие – станок не протекает.

По результатам обработки экспериментальных данных методом регрессионного анализа получены следующие модели зависимости силы тока от параметров режима резания:

$$\text{BT1-0} \quad I = 0,067 \cdot n^{0,54} \cdot s^{0,25} \cdot t^{0,15} \quad R^2 = 0,94 \quad (8)$$

$$\text{OT4} \quad I = 0,13 \cdot n^{0,28} \cdot s^{0,19} \cdot t^{0,12} \quad R^2 = 0,96 \quad (9)$$

$$\text{BT6} \quad I = 0,117 \cdot n^{0,41} \cdot s^{0,35} \cdot t^{0,18} \quad R^2 = 0,88 \quad (10)$$

$$\text{VST5553} \quad I = 0,075 \cdot n^{0,35} \cdot s^{0,26} \cdot t^{0,15} \quad R^2 = 0,97 \quad (11)$$

Полученные данные позволяют определить величину дополнительных напряжений в зоне резания, возникающих под действием электрического тока, протекающего по цепи «станок – инструмент – изделие – станок». Для этого формулу (2) приведем к виду:

$$\sigma_s \approx \frac{p_F j}{e}, \quad (12)$$

где p_F – фермиевский импульс электронов, который можно рассчитать по формуле:

$$p_F = \sqrt{2m\xi_F}, \quad (13)$$

где m – масса фермионов, ξ_F – энергия Ферми, приблизительно равная у металлов $\xi_F \approx 10^{-10} \text{ эВ}$.

Проведя предварительные расчеты, получаем:

$$\sigma_s \approx 0,0843j \quad (14)$$

Плотность тока можно определить, если разделить силу тока, определяемую по формулам (8) – (11), на площадь поперечного сечения стружки.

Отсюда получаем формулы для определения дополнительных напряжений в зоне резания, вызванных действием электрического тока:

$$\text{BT1-0} \quad \sigma_s \approx 0,006 \cdot \frac{n^{0,54} \cdot \sin \varphi}{s^{0,75} \cdot t^{0,85}} \quad (15)$$

$$\text{OT4} \quad \sigma_s \approx 0,011 \cdot \frac{n^{0,28} \cdot \sin \varphi}{s^{0,81} \cdot t^{0,88}} \quad (16)$$

$$\text{BT6} \quad \sigma_s \approx 0,011 \cdot \frac{n^{0,41} \cdot \sin \varphi}{s^{0,65} \cdot t^{0,83}} \quad (17)$$

$$\text{VST5553} \quad \sigma_s \approx 0,006 \cdot \frac{n^{0,35} \cdot \sin \varphi}{s^{0,75} \cdot t^{0,85}} \quad (18)$$

Результаты расчета дополнительных механических напряжений в зоне резания сведем в табл. 7.

Таблица 7

Дополнительные напряжения, создаваемые электрическим током в зоне резания

№	n, об/мин.	s, мм/об.	t, мм.	σ_s , МПа			
				BT1-0	OT4	BT6	VST5553
1	31,5	0,1	0,1	1,48	1,33	1,20	0,83
2	125	0,1	0,1	3,12	1,95	2,10	1,34
3	250	0,1	0,1	4,55	2,37	2,77	1,71
4	31,5	0,1	0,5	0,38	0,32	0,32	0,21
5	125	0,1	0,5	0,80	0,48	0,56	0,34
6	250	0,1	0,5	1,16	0,58	0,74	0,44
7	31,5	0,1	1,0	0,21	0,18	0,18	0,12
8	125	0,1	1,0	0,44	0,26	0,31	0,19
9	250	0,1	1,0	0,65	0,32	0,42	0,24
10	31,5	0,38	0,1	0,54	0,45	0,50	0,31
11	125	0,38	0,1	1,15	0,66	0,88	0,50
12	250	0,38	0,1	1,48	1,33	1,20	0,83
13	31,5	0,38	0,5	1,67	0,81	1,17	0,63
14	125	0,38	0,5	0,14	0,11	0,13	0,08
15	250	0,38	0,5	0,29	0,16	0,23	0,13
16	31,5	0,38	1,0	0,43	0,20	0,31	0,16
17	125	0,38	1,0	0,08	0,06	0,08	0,04
18	250	0,38	1,0	0,16	0,09	0,13	0,07
19	31,5	0,67	0,1	0,24	0,11	0,18	0,10
20	125	0,67	0,1	0,36	0,29	0,35	0,20
21	250	0,67	0,1	0,75	0,42	0,61	0,33
22	31,5	0,67	0,5	1,09	0,51	0,81	0,41
23	125	0,67	0,5	0,09	0,07	0,09	0,05

Таблица 7 (окончание)

Дополнительные напряжения, создаваемые электрическим током в зоне резания

№	n , об/мин.	s , мм/об.	t , мм.	σ_s , МПа			
				BT1-0	OT4	BT6	VST5553
24	250	0,67	0,5	0,19	0,10	0,16	0,08
25	31,5	0,67	1,0	0,28	0,12	0,22	0,11
26	125	0,67	1,0	0,05	0,04	0,05	0,03
27	250	0,67	1,0	0,11	0,06	0,09	0,05

Из табл. 7 видно, что рассматриваемые напряжения варьируются в широких пределах от практически незаметных 0,03 МПа до значительных 4,55 МПа. Дополнительные напряжения способствуют, во-первых, облегчению преодоления препятствий дислокациями, то есть большей пластической деформации, а во-вторых, увеличению силы, действующей со стороны стружки на переднюю поверхность инструмента.

Результаты исследования силы резания при точении приведены на рис. 16, а результаты измерения усадки стружки приведены на рис. 17. Подача и глубина резания были равны: $s = 0,67$ мм/об, $t = 1$ мм.

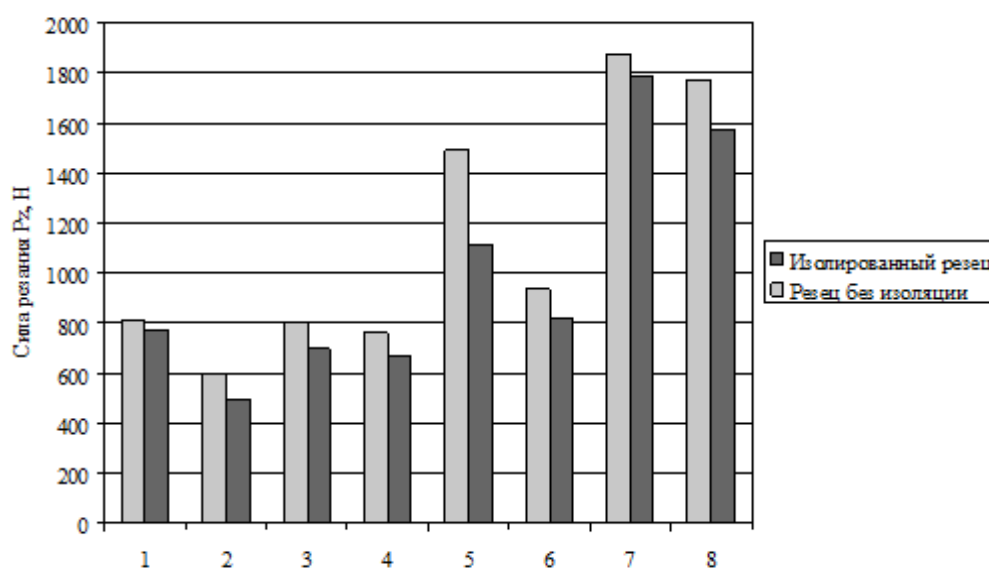


Рис. 16. Изменение силы резания под действием электрической изоляции при:

1. BT1-0, $n = 31,5$ об/мин; 2. BT1-0, $n = 250$ об/мин; 3. OT4, $n = 31,5$ об/мин; 4. OT4, $n = 250$ об/мин; 5. BT6, $n = 31,5$ об/мин; 6. BT6, $n = 250$ об/мин; 7. VST5553, $n = 31,5$ об/мин; 8. VST5553, $n = 250$ об/мин.

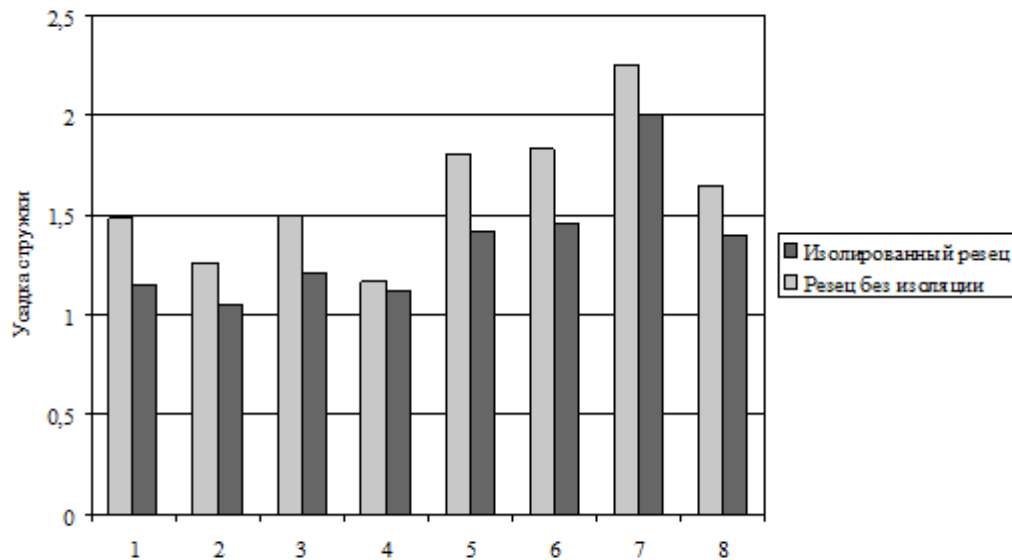


Рис. 17. Изменение усадки стружки под действием электрической изоляции при:
 1. BT1-0, $n = 31,5$ об/мин; 2. BT1-0, $n = 250$ об/мин; 3. OT4, $n = 31,5$ об/мин; 4. OT4, $n = 250$ об/мин; 5. BT6, $n = 31,5$ об/мин; 6. BT6, $n = 250$ об/мин; 7. VST5553, $n = 31,5$ об/мин; 8. VST5553, $n = 250$ об/мин.

Как видно из рис. 16, сила резания при точении уменьшается с ростом скорости резания. При использовании электрической изоляции резца сила резания уменьшается на 10-20%. Уменьшение силы резания свидетельствует об уменьшении напряжений, действующих в зоне резания.

Уменьшение усадки стружки свидетельствует о снижении пластичности обрабатываемого материала в условиях электрической изоляции резца.

В работе [9] предложена следующая методика определения энергии, затрачиваемой на пластическую деформацию металла в процессе резания. Пусть напряжение в деформируемом металле, деформация и работа, затрачиваемая на деформацию, связаны системой уравнений:

$$\begin{cases} \sigma = K \cdot \varepsilon^n \\ A_u = \int_0^{\varepsilon} \sigma d\varepsilon \end{cases} \quad (19)$$

где σ – напряжение, ε – деформация, K – напряжение в металле при деформации в 1%, n – коэффициент упрочнения, определяющий наклон кривой $\sigma=f(\varepsilon)$ в логарифмических координатах; A_u – работа, затрачиваемая на пластическую деформацию.

Поскольку степень пластической деформации определяется усадкой стружки, справедлива следующая формула:

$$\varepsilon = 1,15 \cdot \ln \xi, \quad (20)$$

где ξ – усадка стружки.

Отсюда работу, затрачиваемую на пластическую деформацию металла при резании можно определить как [9]:

$$A_u = \frac{K(1,15 \cdot \ln \xi)^{n+1}}{n+1} \quad (21)$$

Численные значения усадки стружки, необходимые для расчета, приведены в табл. 8.

Таблица 8

Усадка стружки титановых сплавов при точении

Материал	n , об/мин.	s , мм/об.	t , мм.	Изоляция	Усадка стружки ξ
BT1-0	31,5	0,67	1,0	–	1,4828
				+	1,1533
	250	0,67	1,0	–	1,2612
				+	1,0565
OT4	31,5	0,67	1,0	–	1,4989
				+	1,2144
	250	0,67	1,0	–	1,1688
				+	1,1145
BT6	31,5	0,67	1,0	–	1,8013
				+	1,4220
	250	0,67	1,0	–	1,8317
				+	1,4615
VST5553	31,5	0,67	1,0	–	2,2516
				+	2,0056
	250	0,67	1,0	–	1,6424
				+	1,3956

На рис. 18 приведены графики зависимости напряжений от деформации сплавов BT1-0, OT4, BT6 и VST5553. Из рис. 18 получаем исходные данные для расчета энергии, затрачиваемой на пластическую деформацию, приведенные в табл. 9.

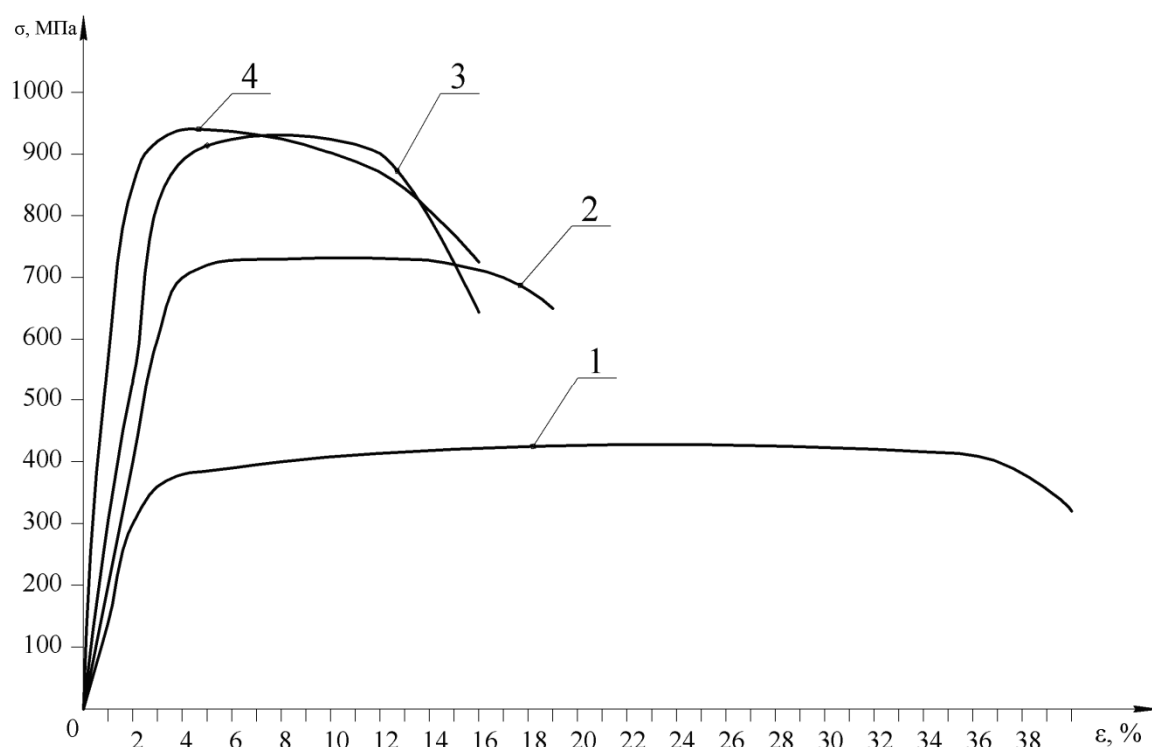


Рис. 18. Диаграммы растяжения сплавов:

1 – BT1-0, 2 – OT4, 3 – BT6, 4 – VST5553

Таблица 9

Исходные данные для расчета энергии пластической деформации

№	Сплав	Напряжение в металле при деформации в 1% K , МПа	Коэффициент упрочнения n
1	BT1-0	140	0,3924
2	OT4	200	0,4903
3	BT6	305	0,1010
4	VST5553	700	0,1435

Воспользовавшись формулой (21) и данными таблиц 8 и 9, получаем результаты расчета энергии, затрачиваемой на пластическую деформацию срезаемого слоя, приведенные в табл. 10.

Таблица 10

Результаты расчета энергии, затрачиваемой на пластическую деформацию срезаемого слоя

Материал	n , об/мин.	s , мм/об.	t , мм.	Изоляция	A_u , МДж.
BT1-0	31,5	0,67	1,0	–	33,3845
				+	8,1132
	250	0,67	1,0	–	15,9790
				+	2,1505
				+	204,4883

Таблица 10 (окончание)

Результаты расчета энергии, затрачиваемой на пластическую деформацию
срезаемого слоя

Материал	n , об/мин.	s , мм/об.	t , мм.	Изоляция	A_u , МДж.
OT4	31,5	0,67	1,0	–	42,9314
				+	14,3767
	250	0,67	1,0	–	10,3666
				+	6,0277
BT6	31,5	0,67	1,0	–	180,2348
				+	102,3698
	250	0,67	1,0	–	185,8860
				+	111,1749
VST5553	31,5	0,67	1,0	–	565,7540
				+	474,5184
	250	0,67	1,0	–	322,2641
				+	204,4883

Из результатов видно, что электрическая изоляция существенно (в 1,4...7 раз) снижает энергию, затрачиваемую на пластическую деформацию в процессе резания.

Таким образом, на основании полученных экспериментальных данных, и их теоретической проработки, можно предложить следующую концепцию влияния электрического тока на процесс резания титановых сплавов:

1. Электрический ток приводит к повышению температуры в зоне резания за счет выделения джоулевого тепла на 0,03...1%;
2. Электрический ток приводит к возникновению дополнительных механических напряжений в деформируемом металле вследствие электронно-пластического эффекта и пинч-эффекта;
3. Механические напряжения, возникающие под действием электрического тока, приводят к облегчению протекания в срезаемом слое пластической деформации за счет облегчения преодоления дислокациями различных препятствий. Одновременно с этим дополнительные механические напряжения приводят к увеличению силы резания по третьему закону Ньютона;
4. Поскольку пластическая деформация под действием дополнительных механических напряжений, инициируемых электрическим током, протекает быстрее, увеличивается усадка стружки, и, одновременно, возрастает энергия, затрачиваемая на пластическую деформацию срезаемого слоя, и общая энергия, потребная для совершения процесса резания;

5. В совокупности увеличение сил резания и пластической деформации приводит к повышенному износу режущего инструмента, а электрическая изоляция режущего инструмента приводит соответственно к меньшим силам резания, и большей энергоэффективности процесса резания.

Заключение

На основании проделанных работ, можно сделать следующие выводы:

1. Показано, что существующая теория, объясняющая повышение стойкости режущего инструмента при электроизоляции уменьшением электродиффузионного износа, недостаточно обоснованна;
2. Получены регрессионные модели зависимости термоЭДС и силы тока при точении от параметров режима резания. Показано, что термоЭДС и сила тока в большей степени зависят от скорости резания, нежели от глубины и подачи;
3. Показано, что электрическая изоляция приводит к уменьшению сил резания и усадки стружки при точении титановых сплавов;
4. Показано, что электрический ток, протекающий в зоне резания, приводит к возникновению дополнительной теплоты Джоуля-Ленца, а также дополнительных механических напряжений в срезаемом слое, обусловленных электронно-пластическим эффектом и пинч-эффектом;
5. Предложена новая концепция влияния электрического тока на стойкость инструмента при резании титановых сплавов.

Список использованных источников

1. Патент РФ №2456125 С2. Способ обработки резанием токопроводящим режущим инструментом изделий из металлов и токопроводящих материалов / В. В. Медисон, В. И. Голубев, С. В. Андреев, Д. В. Калашник, С. М. Мурыжников // Бюллетень изобретений, №20, 2012.
2. Бобровский В. А. Электродиффузионный износ инструмента / В. А. Бобровский – М. : Машиностроение, 1970 – 202 с.
3. Солоненко В. Г. Электроизоляция как метод повышения работоспособности режущих инструментов // Технология металлов, 2009. №2, С.18 – 25
4. Солоненко В. Г. Электроизоляция как метод повышения работоспособности режущих инструментов // Технология металлов, 2009. №3, С.9 – 15
5. Tanaka R. Influence of Additional Electrical Current on Machinability of BN Free-Machining Steel in Turning /R. Tanaka, Y. Lin, A. Hosokawa, T. Ueda, K. Yamada // Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 2009, Volume 3, Issue 2, pp. 171-178. DOI: 10.1299/jamdsm.3.171
6. Батаронов И. Л. Механизмы электропластичности / И. Л. Батаронов // Соросовский образовательный журнал, 1999. №10, С. 93 – 99
7. Troitskii O. A. The electroplastic effect in metals / O. A. Troitskii // Strenght of Materials, Vol. 16, Issue 2, 1984. pp. 277 – 281
8. Dubinko V. I., Klepikov V. F. Kinetic Mechanism of the Electroplastic Effect in Metals / V. I. Dubinko, V. F. Klepikov // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2008, Vol. 72, No 9, pp. 1188 - 1189
9. Astakhov V.P. Tribology of metal cutting – London : Elsevier Science, 2007. – 392 p.